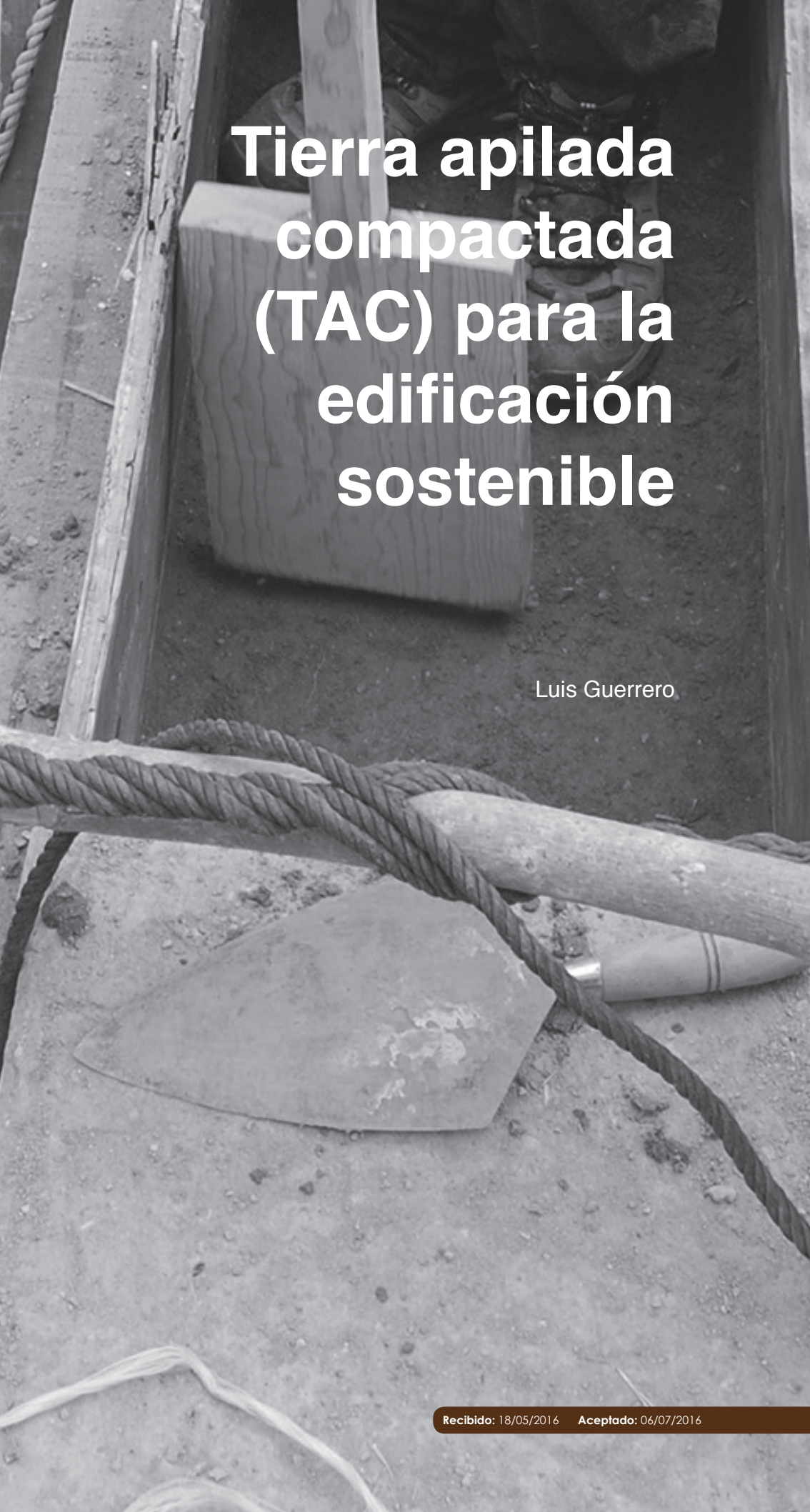


# Rammed Cob for Sustainable Building





# Tierra apilada compactada (TAC) para la edificación sostenible

Luis Guerrero

## Abstract

Contemporary constructive processes that use wet soil, such as poured earth and cast earth, normally require cement or gypsum to accelerate their setting. In addition, they follow the constructive logic of conventional concrete with large formworks, mixing and pumping systems. On the other hand, the construction of rammed earth walls, demands enormous compaction efforts and the use of thick and heavy formworks to withstand the pounding. However, in the UAM-Xochimilco, we are testing the applicability of rammed earth technologies recovering the cob building tradition that was used in the North of Mexico in pre-Hispanic times. For this purpose, it is required to make balls of moist soil that facilitate formwork filling, allow rapid ramming with light tools and may open the forming system in a short time. Thus, it is possible to use small and thin formworks, easily movable for low qualified workers and self-builders. The results are very promising because blocks were obtained in 40 minutes with high resistance to moisture and compression. Furthermore, this technique has a wide potential application in the volumetric restitution of earthen heritage architecture of any technique, without affecting the values and materiality of cultural properties.

Keywords: Soil stabilization, lime, mechanical strength, impermeability.



## Resumen

Los procesos constructivos contemporáneos que utilizan tierra en estado plástico, como sucede con la tierra vertida, *cast earth* y *poured earth*, requieren cemento o yeso para acelerar su fraguado. Además, siguen la lógica constructiva del hormigón convencional con grandes moldes y sistemas de mezclado y bombeo. Por otra parte, la edificación de muros de tapia, demanda enormes esfuerzos de compactación y el uso de encofrados con gruesas paredes para soportar el golpeo. Empero, en la UAM-Xochimilco, se experimenta la aplicabilidad de tecnologías de tierra compactada recuperando la tradición de la tierra modelada *in situ*, que predominaba en el norte de México en la época prehispánica. Para eso se requiere elaborar esferas de tierra en estado plástico que facilitan el llenado de los moldes, permiten una rápida compactación con herramientas ligeras y se pueden desmoldar en poco tiempo. Así, es posible emplear encofrados pequeños y ligeros, fácilmente desplazables por operarios poco tecnificados y por autoconstructores. Los resultados son muy prometedores pues se han obtenido bloques listos en 40 minutos con altas resistencias a la humedad y la compresión. Además, esta técnica tiene un amplio potencial de aplicación en la restitución volumétrica de arquitectura patrimonial de tierra de cualquier técnica, sin afectar los valores y materialidad de los bienes culturales.

Palabras claves: Estabilización de suelos, cal, capacidad de carga, resistencia hídrica.

## INTRODUCCIÓN

La tierra cruda fue el material que se utilizó de manera más intensiva para la conformación de la arquitectura de México desde épocas muy remotas. A partir del empleo de tierra compactada, tierra modelada, bajareque y adobe se edificaron enormes pirámides, templos, palacios, juegos de pelota, fortalezas, depósitos y la mayoría de las viviendas de las civilizaciones prehispánicas.

En regiones con climas extremosos o con altas precipitaciones pluviales, las estructuras de tierra tuvieron que ser preservadas mediante el uso de materiales más resistentes como la piedra y la cal. Este es el caso, por ejemplo, de las grandes pirámides de Teotihuacán, Tula o Cholula –en el centro de México– que, aunque su apariencia es la de monumentos de piedra, en realidad este material solamente corresponde a su capa externa, puesto que el núcleo de las estructuras incluye millones de adobes así como tierra compactada (Figura 1).

Pero, cuando las condiciones climatológicas lo permitían y la calidad de la materia prima era adecuada, esta arquitectura recibía procesos de mantenimiento periódico mediante enjarres de tierra, en combinación con sustancias estabilizantes para proteger sus superficies del viento y lluvias de baja intensidad.

En las regiones del norte de la República Mexicana, cuya cultura prehispánica está vinculada con las civilizaciones del sureste de Estados Unidos, la abundancia de la tierra en comparación con la piedra, y la casi total ausencia de cal, propiciaron el desarrollo de culturas constructivas altamente complejas con las que se levantaban muros, entresijos y techos de edificios –principalmente habitacionales– de varios niveles de altura.

El sistema constructivo de estos inmuebles lamentablemente ha sido poco estudiado y durante décadas se repitió el error de considerar que se trataba de muros de tapia, porque efectivamente las paredes presentan una apariencia bastante llana, con espesores constantes y no poseen una estructura monolítica sino que se observaba la conformación de grandes bloques (Guerrero, Soria y Roux, 2014).

Como se sabe, la construcción de muros de tapia consiste en la compactación de tierra mediante un pisón dentro de un encofrado (Figura 2). A diferencia de otros sistemas térreos, la propiedad cohesiva de las arcillas se complementa con la compresión mecánica del material (Rincón, *et al.*, 2015). Por esto, el grado de humedad del suelo y el índice de plasticidad de sus arcillas se convierten en variables críticas.

Una tierra demasiado húmeda y plástica no puede ser compactada adecuadamente, se adhiere al pisón impidiendo el trabajo y genera alteraciones o deformaciones en las estructuras al ir secando. Sin embargo, un material demasiado seco tampoco va a funcionar aunque se compacte de modo correcto. Se necesita una proporción de agua suficiente para activar las arcillas y propiciar su acción aglutinante (Guerrero, 2007).

Se recomienda el uso de suelo recientemente extraído de su fuente, para que mantenga parte de su humedad natural. De no poderse dar esta condición, es posible humedecerlo ligeramente con una regadera antes de proceder a su compactación. Sin que se trate de una regla estricta, normalmente los rangos de humedad que se requieren para la realización de tapias van del diez al quince por ciento (Hoffmann, *et al.*, 2011).



Figura 1. Núcleos de adobe recubiertos por perfiles de mampostería de piedra en la Pirámide del Sol de Teotihuacán. Fuente: El autor.



Figura 2. Proceso de edificación de muros de tapia en Nochistlán, Oaxaca. Fuente: El autor.

Pero, tras diversos estudios comparativos, ha sido posible observar que las características de los bloques con los que se construyeron los conjuntos habitacionales prehispánicos del norte de México, no coinciden con los de tapia. En primer lugar, los encuentros en las esquinas muchas veces no son ortogonales y es frecuente encontrar uniones boleadas y hasta muros de planta curva. En segundo lugar, no se evidencian las capas de tierra compactada, ni huellas de encofrados o de sus posibles anclajes en el suelo. Luego, cuando se encuentran vestigios derruidos, los bloques no se desmoronan como sucede con los de tapias antiguas (Calvo, 2016) sino



Figura 3. Ruinas de un conjunto habitacional prehispánico de dos niveles. Sirupa, Chihuahua. Fuente: El autor.

que se fraccionan en terrones monolíticos.

Por otra parte, los núcleos de los muros presentan grumos, imposibles de observar en estructuras de tapia porque la resequedad que necesita la materia prima para poderse compactar, y los procesos mismos de compactación, impedirían su conformación. Y finalmente, en los patrones de deterioro de los bloques se notan importantes familias de fisuras que responden a la retracción volumétrica de la materia prima. Esto significa que la tierra que usaron los constructores nativos, contenía un alto nivel de humedad y que al perderla, se redujo el volumen de las piezas y por eso se agrietaron (Figura 3).

Una tierra con altos contenidos de humedad simplemente no se puede compactar pues su comportamiento plástico hace que rebote la herramienta con la que se golpea y el material sólo se reacomoda sin aumentar su densidad. Por lo tanto, parece evidente que esa tipología de estructuras prehispánicas se construyó utilizando la técnica conocida como tierra modelada *in situ*, llamada en España tierra apilada y cob, en inglés (Weismann y Bryce, 2006).

Su ejecución consiste en la factura de barro con 20 a 30% de humedad que después de mezclarse solo o con algún tipo de estabilizante como arena o fibras, permite la conformación de esferas. Estas piezas se conducen hasta el sitio de construcción –en ocasiones lanzándolas a manera de cadena humana– y una vez que los constructores las reciben en la obra, las arrojan con fuerza hacia las capas inferiores y, con algunos golpes, las aglutinan, con lo que se pierde su forma esférica. No se requiere del empleo de mortero alguno porque la propia humedad de las esferas es suficiente para aglutinarlas.

Conforme las capas van secando, se les puede dar forma a los paños exteriores y superiores de los muros y de este modo se configuran bloques con las caras lisas sin la necesidad del empleo de un molde. Es muy probable que el proceso de levantamiento de los muros obedezca a la misma lógica constructiva de cualquier mampostería, en la que se trabaja





Figura 4. Zona arqueológica de Paquimé, Chihuahua, sitio declarado Patrimonio de la Humanidad. Fuente: El autor.

por hiladas y se cuida que los módulos se intercalen o traben, para que no coincidan las juntas verticales de las hiladas superiores e inferiores, lo que debilitaría las estructuras (Guerrero, 2012).

Estudios realizados paralelamente en la Universidad Católica del Perú, arrojan resultados similares a las evidencias arqueológicas mexicanas, para el caso de componentes constructivos del Qhapac Ñan. Pero, las investigaciones peruanas han llegado todavía más lejos al analizar variables como la capacidad de carga, resistencia a la flexión, densidad y módulo de elasticidad (Vargas *et al.*, 2015). Con estos datos han demostrado que los sistemas constructivos prehispánicos no corresponden con la técnica que caracteriza a la tapia (Castellarnau y Rivas, 2014), sino con el modelado *in situ* de tierra en estado plástico.

A partir de estos antecedentes es muy factible suponer que, aunque la construcción con tierra apisonada tiene raíces muy antiguas en todas partes del mundo, específicamente el sistema de edificación de muros de tapia, tal como lo conocemos actualmente –derivado del uso de encofrados y el apisonado de tierra semi-seca–, fueron traídos a América por los conquistadores españoles y portugueses.

Dicha técnica era plenamente conocida por los militares puesto que se empleaba frecuentemente en Europa, Asia y el Norte de África para la edificación de murallas, castillos y torres de vigía. Luego, la técnica se popularizó y se difundió en todo el continente para la edificación de templos, conventos, colegios, haciendas y un número importante de viviendas, cuyos sistemas constructivos han llegado hasta nuestros días con base en la práctica vernácula.

## La estabilización de la tierra

A partir del análisis de las técnicas históricas y tradicionales de construcción, en la Universidad Autónoma Metropolitana Plantel Xochimilco de la Ciudad de México, se han ido desarrollando diferentes estrategias de





Figura 5. Las tapias de tierra y cal que conforman las murallas de Sagunto, España, han resistido por más de un milenio agresiones humanas y climatológicas. Fuente: El autor.

experimentación con tierra, tendientes a conferirle mayores capacidades mecánicas, pero sobre todo, a disminuir su vulnerabilidad ante el agua, ya sea como lluvia o como resultado de la presión freática.

Por casi tres años se han realizado diversas experiencias utilizando procesos de estabilización con cal, pues existen múltiples referencias de su uso como protección de la arquitectura antigua desde hace milenios. El empleo del hidróxido de calcio permitió que complejos sistemas constructivos de tierra subsistieran hasta nuestros días, manteniendo en gran medida sus cualidades estáticas, estéticas, físicas y químicas (Guerrero, 2012).

La mayoría de los estudios que se han hecho respecto al uso de la cal en la arquitectura histórica de tierra en México se han focalizado hacia los estucos, pinturas murales y relieves policromados que se integraban a templos y palacios. Empero, es evidente que la presencia de superficies encaladas, así como su aplicación en morteros, formó parte de prácticamente todos los muros, cubiertas y pavimentos de espacios destinados a funciones rituales, productivas, civiles y habitacionales realizadas en el pasado, todavía incluso hasta mediados del siglo XX (Barba y Villaseñor, 2013).

Sin embargo, la aplicación de la cal, como material estabilizante en la arquitectura de tierra, ha sido escasamente estudiada. Desde tiempos remotos se utilizaron pequeñas proporciones de hidróxido de calcio para incrementar la durabilidad de componentes contruidos con tierra. Se ha documentado la presencia de cal en muros y recubrimientos de tierra de la zona arqueológica de Paquimé en Chihuahua (Figura 4), así como en la mayor parte de las cimentaciones de la ciudad de Tenochtitlan en el centro de México.

Pero, esta cultura constructiva que todavía en los años cincuenta y sesenta del siglo XX era muy frecuente, paulatinamente fue desplazada por el uso de componentes constructivos industrializados como el cemento. Dos cambios generacionales fueron suficientes para que la sabiduría de miles de años fuera considerada obsoleta y el patrimonio intangible constituido por el conocimiento de sus condicionantes de elaboración fuera olvidado (Guerrero, 2007).

Afortunadamente en años recientes, a partir del auge que ha tomado el diseño de arquitectura sostenible, el uso de la tierra y la cal progresivamente va adquiriendo una nueva dimensión, al ponerse en evidencia sus calidades económicas, ecológicas y sanitarias.

Se denomina estabilización de la tierra a los procesos físicos, químicos o físico-químicos que permiten controlar los cambios dimensionales que sufren las arcillas al entrar en contacto con el agua (Fernández, 1992). Para llevar a cabo estos procedimientos, además de la compactación y el control granulométrico, históricamente se ha utilizado el agregado de diferentes tipos de materiales orgánicos e inorgánicos, tales como paja, azúcares, extractos vegetales, estiércol, grasas animales, aceites y, desde luego, la cal.

Aunque existen documentos antiguos que hablan de su aplicación en estructuras de tierra, en textos tales como *Los Prolegómenos* de Ibn Jaldun, escritos aproximadamente en el siglo XIV, es evidente que su uso es mucho más remoto y que tuvo difusión en todo el orbe dentro de diversas culturas constructivas (Guillaud, 2012).

La cal se ha empleado como consolidante de pavimentos de tierra, en cimentaciones, en cisternas, acueductos, baños, en la elaboración de adobes, muros de tapia y más recientemente en la fabricación de bloques de tierra comprimida (De Oliveira, 2005).

Desde la segunda guerra mundial los suelos estabilizados con cal han sido muy utilizados en obras de ingeniería civil, principalmente en sub-bases de carreteras, vías del ferrocarril y presas (Hoffmann, *et al.*, 2011). Por este motivo, se han desarrollado importantes investigaciones y prácticas sobre esta estrategia que han derivado en una creciente cantidad de normas y especificaciones técnicas, probadas por más de cuarenta años en países tales como Alemania, Brasil, España, Estados Unidos, Francia, Gran Bretaña y recientemente en México (ONNCCE, 2016).

Aunque se cuenta con datos históricos acerca de este tema y se han corroborado científicamente las cualidades de la aplicación de cal como estabilizante de la tierra, todavía quedan muchos datos por descubrir, sobre todo acerca de los fenómenos químicos que se desarrollan internamente en estas mezclas.

Se sabe de manera general que en virtud de la dimensión y estructura laminar de las partículas de los minerales arcillosos del suelo, los cationes de calcio se insertan entre las micelas de las arcillas incrementando su estabilidad, sobre todo ante la presencia del agua. Pero, dada la diversidad de arcillas presentes en la naturaleza y la gran cantidad de componentes químicos que suelen contener, la relación de los cationes presenta notables variaciones en su comportamiento. Algunos estudios han demostrado que en estas mezclas se detectan formaciones de neo-silicatos y aluminatos hidratados de calcio, que son muy adecuadas para mejorar las propiedades de los suelos, además de la contribución derivada de la propia carbonatación del hidróxido de calcio, que entre en contacto con el bióxido de carbono del aire (De Oliveira, 2005).

## Trabajo experimental

Con estos antecedentes, en el Laboratorio de Materiales de la UAM-Xochimilco se ha venido desarrollando una serie de investigaciones tendientes a recuperar el uso de la cal como estabilizante de la tierra.



Figura 6. Llenado y compactado de las esferas dentro de moldes diseñados a escala para un ejercicio docente. Fuente: El autor.

(Guerrero, Soria, García, y Fernández, 2015). Estos trabajos tuvieron resultados parciales que fueron aplicados en la edificación de un espacio de usos múltiples de 50 m<sup>2</sup>, emplazado en terrenos pertenecientes a la universidad, en el barrio de Las Ánimas, Tulyehualco, al sur de la Ciudad de México.

Pero en la actual etapa del proceso de investigación, se trabaja tanto en propuestas para un diseño contemporáneo sostenible como en la restauración patrimonial. Por ello, una vez probada la eficiencia de la cal, se experimentan diferentes métodos de aplicación que propicien la disminución de los esfuerzos de compactación requeridos, a partir de incrementos graduales en la cantidad de agua de mezclado. La intención es conseguir componentes térreos resistentes a la humedad, con mayores capacidades de carga, con procesos de endurecimiento más veloces, pero que demanden un trabajo menor para su realización.

En los procedimientos de tierra vertida que se han desarrollado de manera convencional, los moldes se llenan por completo con material en estado semilíquido hasta que endurezcan. Para ello, a la tierra se le agregan estabilizantes de fraguado rápido como el cemento o el yeso. Sin embargo, se trata de procesos caros, complejos, con alto impacto ambiental y demandantes de tecnología sofisticada.

En cambio, la técnica que se está experimentando se sustenta en la aplicación y compactación por capas de tierra estabilizada con un poco de cal, y un nivel de humedad cercana al 20%, que se introduce en el encofrado en forma de esferas ligeramente amasadas por los constructores (Figura 6).



Se trata de un procedimiento que fusiona los principios de la tierra modelada *in situ* (cob) y la tapia pisada. Se incorpora al sistema una cantidad de agua apenas suficiente como para poder configurar y ligar las esferas pero sin un exceso que pueda dificultar su compactación contra las caras y la base del encofrado, con una herramienta mucho más ligera que un pisón. El proceso de modelado de las esferas de aproximadamente 6 a 8 cm de diámetro tiene gran importancia. La tierra que ha sido previamente mezclada con agua y los estabilizantes, se amasa y se comprime ligeramente para poderle dar forma. De este modo el material pierde aire, se incrementa su densidad y se provoca un secado diferencial entre los núcleos y las superficies. Conforme se van realizando las esferas se dejan reposar en el suelo, de preferencia a la sombra y cubiertas por un plástico. Posteriormente se trasladan al lugar de construcción donde ya se ha instalado y anclado adecuadamente el encofrado y se lanzan con fuerza hacia su base hasta cubrirla por completo. Luego se procede a la compactación de esa primera capa hasta que la forma de las esferas desaparece y se obtiene una superficie de un nivel uniforme y liso. A continuación se vuelve a arrojar otra capa de esferas y se repite el proceso hasta que se llena el molde.

Al concluir esta operación, las caras del molde pueden ser abiertos pues la tierra en el interior ya adquirió la resistencia necesaria y entonces es posible elaborar el bloque contiguo para proseguir la hilada del muro, de manera similar a la edificación con tapia pisada. Los encofrados que se han utilizado para las prácticas a escala natural, se hacen con tablas de madera contrachapada con dimensiones de entre 20 y 40 cm de ancho, entre 120 y 180 cm de largo y 60 cm de altura. Las placas laterales se mantienen separadas por las tablas que sirven como tapas y el sistema se une mediante ocho barras con "rosca sin-fin" que se sujetan en sus extremos con arandelas y tuercas.

El hecho de contar con el molde no solamente ayuda a dar regularidad al sistema constructivo sino que asegura que la energía que se imprime durante el proceso de compactación se optimice al evitar el desplazamiento del barro en estado plástico. De este modo se incrementa notablemente la densidad de los componentes constructivos y se propicia un secado rápido y homogéneo.

La técnica ha sido probada en diferentes escalas siempre con notable éxito tanto en la organización de trabajo como en los resultados físicos obtenidos. Las paredes de los encofrados son simplemente tablas de 12 a 15 milímetros de espesor porque los empujes de la tierra no son demasiado fuertes ni tampoco los golpes de compactación, los cuales se realizan con herramientas de madera de 30 a 40cm de longitud y con un peso que nunca supera un kilogramo.

Para las probetas de laboratorio lógicamente estos pequeños pisonos de madera son todavía más pequeños y ligeros con lo que el proceso se agiliza y facilita aún más. Igualmente la dimensión de las esferas también se escala y para las probetas de 36 x 18 x 9cm tenían un diámetro de tres centímetros aproximadamente, mientras que para las probetas cúbicas de 5cm de lado medían un centímetro.

Para dichos ensayos se mantuvo constante el empleo del tipo de tierra local conocido en la Ciudad de México como "tepetate" cuya caracterización en laboratorio mostró que el 31% de sus partículas finas pasaron por el tamiz No. 200 de las cuales se determinó un Límite Líquido de 42.1 y un Límite

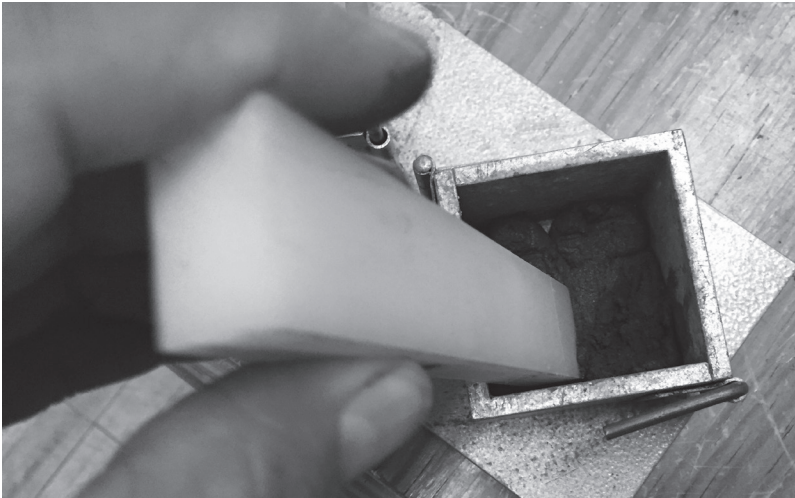


Figura 7. Llenado y compactado de las esferas dentro de los moldes de laboratorio. Fuente: El autor.

Probetas	Materiales y Dosificación	Resistencia promedio a la compresión (kg/cm²)
A	Tierra (sin compactar)	46.1
B	Tierra Apilada Compactada (TAC)	71.4
C	TAC+Arena (1:1)	39.3
D	TAC+Arena (2:1)	27.6
E	TAC+Arena+Cal (2:1:0.05)	29.3
F	TAC+Arena+Cal (1:1:0.05)	22.9
G	TAC+Cal (1:0.05)	26.2

Figura 8. Resultados promedio de los ensayos de compresión simple de probetas cúbicas.

Plástico de 26.3 dando como resultado un Índice de Plasticidad de 15.8. Este dato al ser superior al referente de 7, permitió llegar a la conclusión de que el material corresponde al grupo “SC”, es decir, “Arenas arcillosas”, dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Juárez, 2010:160).

La cal empleada para estabilizar la tierra es de tipo aéreo marca Calidra con 82% de  $\text{Ca(OH)}_2$ , y se agregó en polvo para lograr una mejor distribución en una dosificación del 5% en volumen. Para evitar la retracción de la tierra al secar se agregó arena en dos dosificaciones 50% y 100% en volumen.

Para los ensayos de compresión simple se realizaron probetas cúbicas de 5cm de lado. Una vez que secaron por completo durante 28 días en áreas con temperatura y humedad controladas, fueron sometidas a ensayos de compresión en una prensa manual digital ELVEC, modelo E 657-1 (ASTM C39; AASHTO T22). Los resultados promedio se muestran en la Figura 8.

Como se sabe, los principales problemas de vulnerabilidad de la tierra utilizada como material constructivo provienen de dos procesos: las posibles sobrecargas de tipo gravitatorio o sísmico y las afectaciones derivadas de la humedad. Entonces, la mejor manera de desarrollar tecnologías sostenibles

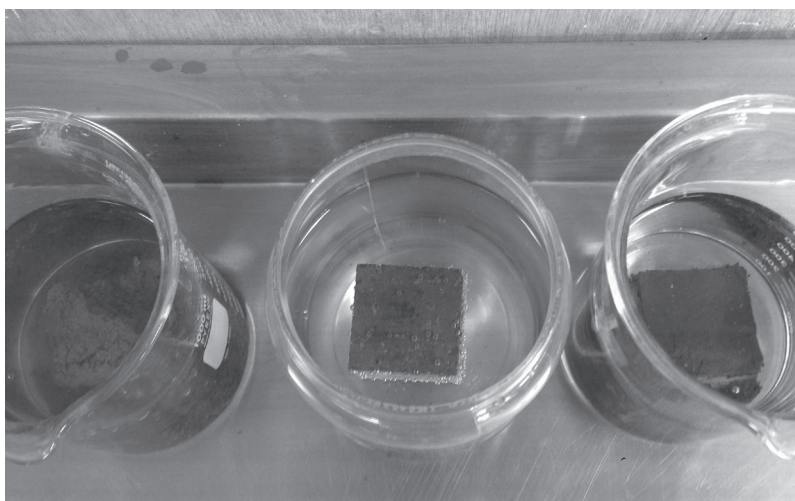


Figura 9. Probetas A, E y B después de media hora de inmersión. Fuente: El autor.

de construcción radica en conferirles a los componentes constructivos una capacidad de carga razonable para que trabajen de manera articulada, pero sobre todo, en evitar potenciales penetraciones de agua, pues éstas afectan la durabilidad del sistema y su resistencia estructural.

Por tal motivo, en todas las pruebas realizadas, se pondera el uso de la cal como material estabilizante y se realizan ensayos para evaluar la forma en que este agregado modifica la absorción capilar de los sistemas constructivos y la posible disgregación de las redes que configuran las arcillas con el limo y la arena.

Para ello, una serie de probetas cúbicas semejantes a las ensayadas a compresión, fueron sometidas a una prueba de inmersión total en agua, durante la cual se registró el tiempo de afectación y se videograbó el proceso.

Las probetas del grupo A, que tenían tierra sin estabilizar ni compactar, resistieron 32 minutos antes de desintegrarse y sedimentarse. En el extremo opuesto, todas las probetas E, F y G, que fueron estabilizadas con 5% de cal, permanecen intactas bajo el agua después de más de diez meses de haber iniciado los experimentos (Figura 9).

Sin embargo, un dato de gran relevancia para el tema desarrollado en este texto, es que las probetas tipo B realizadas con suelo natural pero que recibieron el proceso de apilado en esferas y posterior compactación, presentaron una desintegración 76 veces más lenta que las del tipo A. Por su parte, las probetas tipo C y D se disolvieron gradualmente, pero su sedimentación final se produjo después de casi 53 horas.

La vinculación de los resultados de resistencia mecánica e hídrica nos permite destacar primero: que todas las probetas que fueron estabilizadas con arena, así como con arena y cal, redujeron su capacidad de carga con respecto a los tipos A y B. Es decir, la tierra natural –especialmente la apilada y compactada– tiene una mayor cohesión y densidad, pero presenta la grave desventaja de que se desintegra en el agua.

Si bien es cierto que la reacción con la cal del tipo de tierra evaluado disminuye su resistencia a la compresión, también decrece su vulnerabilidad





Figura 10. Muros de TAC de una vivienda en proceso de autoconstrucción asistida, expuestos a la intemperie. México D.F. Fuente: El autor.

hídrica, con lo que se obtienen grandes ventajas. También, se observó que los mejores resultados, combinando ambas variables, se dieron con las mezclas de las probetas tipo E, que resistieron casi  $30 \text{ kg/cm}^2$  y que persisten bajo el agua sin desintegrarse.

Finalmente, se demostró que el sistema constructivo de TAC, incrementa la resistencia a la compresión en 55%, y su resistencia a la humedad por inmersión radicalmente, pues su velocidad pasó de media hora a 38 horas. Queda por investigar el papel que juega la arena dentro del sistema, pues se nota que ésta reduce notablemente la capacidad de carga, pero en cambio incrementa el tiempo que tarda el material compactado en desintegrarse. Es posible que la presencia de este árido le proporcione una estructura más estable a la tierra, de tal modo que la compactación surte mayor efecto al intercalarse a nivel microscópico las partículas pequeñas entre las grandes, con lo que se obtienen componentes más densos y, por lo tanto, menos vulnerables al agua.

A partir de los resultados obtenidos en las prácticas de laboratorio desde hace dos años, se han ido desarrollando diversos talleres de transferencia de tecnología dirigidos tanto a estudiantes de arquitectura como a miembros de la comunidad. En estos procesos se ha podido confirmar la facilidad con la que los constructores pueden apropiarse de este sistema constructivo, con lo que se avanza hacia su sostenibilidad.

Asimismo, se edifica una vivienda de dos niveles con muros de TAC en el barrio de San Pedro Mártir en la periferia de la Ciudad de México. La obra está siendo realizada por autoconstrucción asistida, con la participación de solamente dos albañiles que no tenían experiencia previa en el uso de esta técnica y que la han logrado dominar.

Además, la obra sin concluir está expuesta a la intemperie sin ningún tipo de recubrimiento y las fuertes temporadas de lluvias del 2015 y el presente año no le han hecho el menor daño. Los muros tienen 24cm de espesor en la planta baja y 18 en la planta alta. En algunas secciones de los muros se intercalaron botellas de vidrio recicladas para conformar una especie de vitrales (Figura 10).



Figura 11. Restitución volumétrica sobre un velado de papel japonés, en una escultura prehispánica de tierra modelada in situ. El Zapotal, Veracruz. El autor.

Finalmente, este técnica ha sido probada para la restauración de edificios de tierra que han sufrido pérdidas volumétricas. Entre las ventajas de emplear TAC para el relleno de faltantes en estructuras patrimoniales de tierra, destaca su compatibilidad con componentes realizados con otros sistemas como el adobe, la tapia o el bajareque. Además, debido a que la cantidad de agua requerida para apilar y compactar la materia prima es mínima, no se afecta la estabilidad de las estructuras vecinas por flujos hídricos.

Por otra parte, como los procesos de compactación no requieren demasiada fuerza ni el uso de herramientas pesadas, tampoco se daña la arquitectura histórica de tierra por efectos mecánicos. Finalmente, si las capas de TAC se aplican sobre un velado de papel japonés o sobre un geotextil adecuadamente humedecido, se consigue una intervención que además de no agredir a los sustratos patrimoniales, resulta reversible pues en el momento que se desee puede ser retirada de las áreas intervenidas, tanto para el monitoreo de la restauración, como para la incorporación de otras estrategias de consolidación o de restitución (Figura 11).

## Conclusiones

La construcción con tierra tiene una amplia gama de opciones de desarrollo, acordes con las necesidades locales y los recursos disponibles. Existen muchas técnicas de origen ancestral que no han recibido la atención que merecen y que pueden satisfacer requerimientos de grupos sociales de diferentes condiciones y formas de vida.

Este es el caso del sistema de construcción de muros con tierra apilada que ha demostrado su alto nivel de sostenibilidad, simplemente por el hecho de haber sido utilizada por milenios para la edificación de viviendas de varios pisos, y seguir vigente hasta el día de hoy. Se trata de una técnica que optimiza el potencial de aplicabilidad de los suelos utilizando sólo la cantidad de agua que es necesaria para conformar sistemas estructurales estables.



Figura 12. Restitución de un tramo de muro patrimonial con Tierra Apilada Compactada (TAC). Estación de ferrocarril de Oaxaca. Fuente: El autor.

La pequeña innovación derivada del uso de encofrados, la compactación y la estabilización de las tierras con arena y cal, genera un gran avance tecnológico que le da alta viabilidad al sistema para su uso en diferentes sectores sociales, tanto en el ámbito rural como urbano.

Asimismo, se propician procesos de autoconstrucción asistida de vivienda con recursos técnicos apropiados y apropiables que demandan poco esfuerzo físico y gasto económico.

Esta propuesta permite revertir drásticamente la vulnerabilidad de la tierra ante el agua sin que el material pierda su porosidad y permeabilidad al vapor, factores que tienen incidencia en su respuesta higrótérmica y en la adherencia de morteros y enlucidos.

Finalmente, constituye una estrategia de intervención en estructuras preexistentes que han sufrido daños o faltantes, mediante la cual es posible recuperar no solamente la volumetría perdida sino, sobre todo, la estabilidad estructural (Figura 12.). Además, la incorporación de cal a estas integraciones de restauración, evita el ascenso por capilaridad de los mantos freáticos y la consecuente generación de eflorescencias salinas en las bases de los muros, que es un problema recurrente en los bienes patrimoniales.

Es fundamental difundir a la sociedad los conocimientos relacionados con el uso de la tierra y la cal, pues no se trata de nociones que pertenezcan a ámbitos especializados de académicos del diseño, la ingeniería, la construcción o la restauración de monumentos, sino que son parte de la sabiduría tradicional que debería recuperar su lugar en la cultura popular (Guerrero, 2014).

## Referencias bibliográficas

Barba, L. y Villaseñor, I. (2013). *La cal. Historia, propiedades y usos*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas-UNAM.

Calvo, L. (2016). "Conservation of rammed-earth structures: the Hispano-Colonial archeological site of Santa Fe La Vieja, Argentina". En *TERRA 2012/12th SIACOT Proceedings*. (pp. 91-95). Lisboa: Argumentum.



Castellarnau, A. y Rivas, F. (2014). "Dos caras de una misma técnica constructiva: registro y transmisión de la construcción en tapia". En Sáinz, J. L. y Jové, F. La arquitectura construida en tierra. Patrimonio y vivienda. (pp. 97-108). Valladolid, España: Universidad de Valladolid.

De Oliveira, M. (2005). "O solo-cal: uma visão histórica e documental". Memórias del IV SIACOT-IIIATP. (pp. 106-110). Monsaraz, Portugal: Escola Superior Gallaecia.

Fernández, C. (1992). Mejoramiento y estabilización de suelos. México: Limusa.

Guerrero, L. (2007). "Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva". Apuntes. Vol.20. No.2. (pp. 182-201). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Guerrero, L. (2012). "Patrimonial rammed earth structures at the Sierra Nevada, Mexico". En Mileto, Vargas y Cristini (Eds.) Rammed earth conservation. (pp. 3-8). Londres: Taylor and Francis.

Guerrero, L. (2014). "Tradición constructiva con tapial en las faldas orientales del Iztaccíhuatl". Revista Palapa. No.15. (pp. 68-81). Colima, México: Universidad de Colima.

Guerrero, L.; Soria, F. J. y Roux, R. (2014). "Edificación de muros de tierra vertida, estabilizados con cal y puzolanas". En Arquitectura de tierra: Patrimonio y Sustentabilidad en Regiones Sísmicas. Memorias del XIV SIACOT. (pp. 192-197). San Salvador: PROTERRA-FUNDASAL.

Guerrero, L.; Soria, F. J.; García, J. R. y Fernández, F. (2015). "Comportamiento térmico de un módulo experimental construido con tierra vertida compactada en la Ciudad de México". En Memorias de EURO-ELECS-2015. (pp. 739-746). Guimarães, Portugal.

Guillaud, H. (2012). "Pisé". Evolution, innovations, resistances and future directions. En Mileto, Vargas y Cristini (Eds.) Rammed earth conservation. (pp. 3-8). Londres: Taylor and Francis.

Hoffmann, M. et al. (2011). "Tapia". En Neves, C. y Faria, O. (Eds.) Técnicas de construção com terra. (pp. 46-61). Bauru, Brasil: FEBUNESP/PROTERRA.

Juárez, E. y Rico, A. (2010). Mecánica de suelos, tomo I, fundamentos de la mecánica de suelos. México: Limusa.

ONNCCE (2016). Norma NMX-C-508-ONNCCE-2015. Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados con Cal. Especificaciones y Métodos de Ensayo.

México. Consultada en: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5432969&fecha=13/04/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5432969&fecha=13/04/2016)

Rincón, L. et al. (2015). "Experimental rammed earth prototypes in Mediterranean climate". En Mileto, C. et al. Earthen architecture. Past, present and future. (pp. 311-316). Londres: Taylor and Francis.

Vargas Julio et al., (2015). "Camino prehispánico Pando". En Memorias del XV SIACOT. (pp. 284-297). Cuenca, Ecuador: PROTERRA-Universidad de Cuenca.

Weismann, A. & Bryce, K. (2006). Construire en terre facilement. La technique du cob. París: La plage.